

3. PET検出器の特性からみた収集条件の確立

Symposium

本村信篤

東芝メディカルシステムズ株式会社CT・核医学開発部

PET装置の性能／特性はハードウェアとソフトウェアの両面から決定される。ハードウェアはシンチレータ・光電子増倍管・信号処理回路などからなり、ソフトウェアはランダム補正・散乱補正・再構成法などである。したがって、同じシンチレータでも全く性能の異なるPET装置となる。しかしシンチレータがPET装置において重要な要素であることも事実である。今回のシンポジウムでは、このシンチレータの特性とPET性能との関係について紹介した。

PET用のシンチレータとしては、NaI(Tl)に始まり、現在ではBGO、GSO、LSOを使用した装置が製品化されている。研究段階のものとしてはLYSO、LSF、YAP、BF₂などがある。今回は、主に現製品で使用されているNaI(Tl)、BGO、GSO、LSOに絞り、比較検討を行った。各シンチレータの特性(密度・実効原子番号・平均飛程・発光量・発光減衰時間・潮解性・頑丈さ・発光波長・発光反射係数)をTableにまとめた。PET性能を示す感度、位置分解能、計数率特性、散乱線含有率、ランダム混入率の各項に関して、関連するシンチレータ特性について考察した。

感度は、実効原子番号・平均飛程が大きく関与し、密度・発光波長・発光反射係数も関与する。感度は、 γ 線との相互作用(光電効果・コンプトン効果)の確率そのものであり、これは「電子の数=実効原子番号」に依存する。発光波長・発光反射係数は光電子増倍管への信号の伝達割合に関係し、伝達割合が悪い(信号伝達にロスがある)と感度低下になる。

位置分解能は、実効原子番号・平均飛程・発光量が大きく関与する。平均飛程が短いほど、斜め入射の影響が小さく視野の周辺での位置分解能劣化(いわゆるDOI(depth of interaction効果)が抑えられる。発光量はアンガー型の位置検出分解能に関与し、発光量が少ないと統計ノイズのためにアンガー型位置計算(複数の光電子増倍管による重み付け計算)のゆらぎが大きくなり、位置分解能が劣化する。ゆえにシンチレータブロックのサイズを小さくしただけで良好な位置分解能が実現できるとは限らず、それに見合う発光量(=信号量)が必要となる。

計数率特性は、発光減衰時間が大きく関与する。発光減衰時間は一つの信号を計測する時間を決める。したがって発光減衰時間が長いと、高計数率領域で複数の信号重なり(いわゆるpile-up)が生じ、数え落としが大きくなる。3D収集の場合に特に問題になる。

散乱線含有率は、発光量が大きく関与し、発光減衰

Table PETで使用される代表的なシンチレータの物理特性

特性	BGO	GSO	LSO	NaI(Tl)
密度(g/cm ³)	7.13	6.71	7.40	3.67
実効原子番号	75	59	65	51
平均飛程(mm)	10.4	14.9	11.5	28.8
発光量(光子/MeV)	8200	10000	30000	38000
発光減衰時間(ns)	300	60	40	230
潮解性	No	No	No	Yes
頑丈さ	Yes	No	Yes	No
発光波長(nm)	480	430	420	410
発光反射係数	2.15	1.85	1.82	1.85

BGO(ビスマスゲルマニウムオキサイド) Bi₄Ge₃O₁₂

GSO(ガドリニウムシリコンオキサイド) Gd₂SiO₅:Ce

LSO(ルテチウムシリコンオキサイド) Lu₂SiO₅:Ce

時間・発光波長・発光反射係数も関与する。発光量はエネルギー分解能に関与し、発光量が少ないと統計ノイズのために測定されたエネルギー値のゆらぎが大きくなり、エネルギー分解能が劣化する。エネルギー分解能が劣化すると一次光子と散乱線の区別がつかなくなり、散乱線含有率が増加する。発光波長・発光反射係数は光電子増倍管への信号の伝達割合に関係し、伝達割合が悪いと感度が低下し、エネルギー測定における統計ノイズの影響が強くなる。

ランダム混入率は、発光量・発光減衰時間が大きく関与する。発光量が大きくまた発光減衰時間が短いと信号パルスの立ち上がりが急峻になる。急峻なパルスは信号発生のタイミング(トリガー)を高い時間分解能で捉えられる。これにより同時計測に必要なコインシデンスウインドウ時間を短縮でき、ランダム混入率を低減できる。3D収集の場合に特に重要である。

以上、個々のシンチレータ特性とPET性能の関係を考察してきた。以下に、シンチレータごとにその特徴をまとめる。

- ・BGOは、感度が大変に高い。高計数率は苦手(3D収集には不向き)。視野周辺での位置分解能劣化が少ない。
- ・GSOは、感度は高くない。高計数率は得意(3D収集に適している)。視野中心の位置分解能が良い。
- ・LSOは、感度が高い。高計数率は得意(3D収集に大変に適している)。視野中心、周辺とも位置分解能が良い。

以上のように、シンチレータの特性をPET性能の関係を理解したうえで、PETの収集条件を決めることが重要であると考えられる。